

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/285322361>

Modellierung der Bandbewegung beim Verzinken von Stahlblech

Conference Paper · March 2015

CITATIONS

0

READS

89

2 authors, including:



[Chris Günther](#)

Hochschule Ruhr West

1 PUBLICATION 0 CITATIONS

SEE PROFILE

Modellierung der Bandbewegung beim Verzinken von Stahlblech

von C. Günther¹ ; K. Kolahi²

1 Zusammenfassung

Der Bedarf an feuerverzinkten Stahlbändern ist besonders in der Automobilindustrie sehr groß und es werden zugleich immer höhere Qualitäten gefordert. Hierbei bildet vor allem die Homogenität der Zinkschichtdicke ein entscheidendes Qualitätsmerkmal. Um das Stahlband ausreichend vor Umwelteinflüssen zu schützen, muss eine, vom Kunden spezifizierte, Mindestzinkschichtdicke aufgetragen werden. Beim hier angewandten Verzinkungsverfahren durchläuft das Band ein Zinkbad und anschließend wird das überschüssige Zink berührungslos mittels sogenannten Abblasdüse so abgetragen, sodass eine möglichst homogene Zinkschicht erhalten bleibt. Hierzu ist es notwendig den Abstand zwischen Band und Airknife konstant zu halten.

Störende Bandbewegungen führen zu inhomogenen Zinkschichtdicken, welche die Qualität der Verzinkung vermindern. Diese Qualitätsverminderung und der erhöhte Zinkeinsatz soll durch geeignete Maßnahmen verringert werden.

Bisher eingesetzte berührungslose Bandstabilisatoren können die Bandbewegung im Allgemeinen dämpfen, jedoch treten noch Betriebszustände auf, in denen eine inhomogene Zinkschicht sichtbar ist. Die Ursache dieser Inhomogenitäten liegt in anlagenbedingten dominanten Schwingungen des Bandes, deren Ursache zu klären ist.

Im vorliegenden Beitrag wird ein Modell der Bandbewegung vorgestellt, das durch die theoretische Modellbildung und experimentelle Identifikation erstellt worden ist.

Das Modell beschreibt die Bewegung des Bandes bezüglich ausgewählter Freiheitsgrade und ermöglicht die Analyse der kritischen Betriebszustände. Darüber hinaus soll dieses Modell zur Stabilisierung des Bandes in einer modellgestützten Regelung verwendet werden.

2 Prozessbeschreibung

Das zu verzinkende Stahlblech wird in Form von Coils ins Werk geliefert und für die Verzinkung zu Endlosbändern zusammengefügt. Bis zum eigentlichen Verzinkungsprozess durchläuft das Blech einen Rekristallisationsofen, der unter anderem die für das Verzinken notwendige Bandtemperatur einstellt; Das Blech durchläuft ein Bad aus flüssigem Zink, dabei haftet eine unbestimmte Menge dieses am Band. Über eine Umlenkrolle, der Pottrolle, wird das Blech durch weitere Korrekturrollen zum Abstreifprozess geführt. Mit Hilfe der Korrekturrollen kann eine quer zur Laufrichtung auftretende Verformung des Bandes (z.B. Crossbow) korrigiert werden. Aus den beidseitig angebrachten Abstreifdüsen wird unter hohem Druck Luft sowohl auf die Vorder-, als auch auf die Rückseite geblasen. Durch diesen Luftstrom werden Teile des noch flüssigen Zinkes abgetragen. Je kleiner der Abstand zwischen Blech und Düsenlippe ist, desto mehr Zink wird abgetragen. Oberhalb der Abstreifdüse befindet sich der

¹ Chris Günther, M.Sc., Hochschule Ruhr West, Mülheim an der Ruhr, chris.guenther@hs-ruhrwest.de

² Prof. Dr.-Ing. habil. Kourosh Kolahi, Hochschule Ruhr West, Mülheim an der Ruhr

Bandstabilisator eMASS[®], ein Produkt der EMG Automation GmbH. Der Bandstabilisator besteht aus bis zu acht nebeneinander differenziell angebrachten Elektromagnetpaaren, den Aktuatoren. In den Aktuatoren sind jeweils zwei, ebenfalls differenziell angebrachte, Wirbelstromsensoren integriert um den Abstand zwischen Band und Aktuator zu messen.

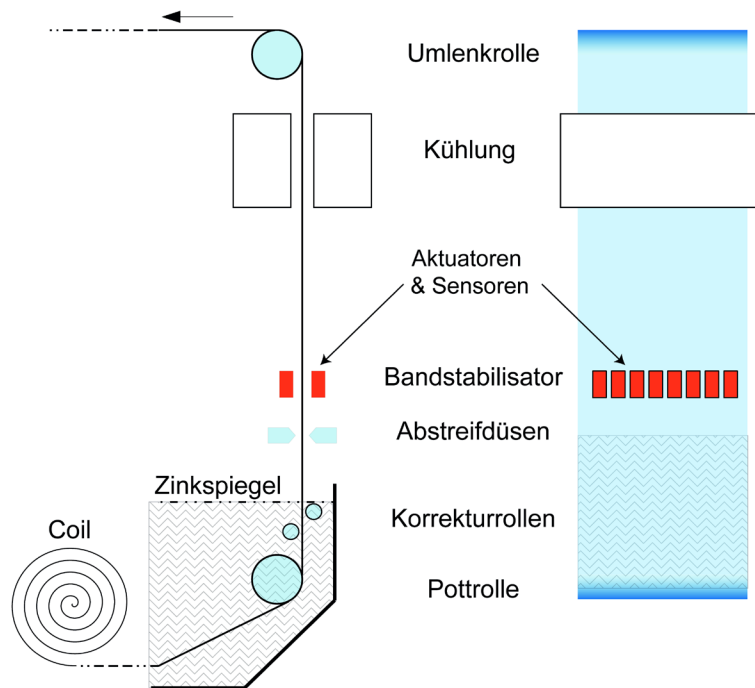


Bild 1: schematische Darstellung eines typischen Verzinkungsprozesses; links: Seitenansicht; rechts: Frontalansicht

Oberhalb des Bandstabilisators befinden sich mehrere Kühlstufen um das Band und die Zinkschicht abzukühlen. Darauf folgen weitere Prozessschritte und eine Qualitätskontrolle, bei der die beidseitige Zinkschichtauflage mit einer radiometrischen, traversierenden Messung kontrolliert wird. Auch wird nachfolgend eine zusätzliche visuelle Kontrolle vorgenommen, um kleinste Fehlstellen zu lokalisieren.

2.1 Band

Das Band ist ein ferromagnetisches Stahlblech, welches in verschiedenen Dicken und Breiten gefertigt wird. Das Band wird hier als zweiseitig eingespannt betrachtet (Bild 2), wobei die Einspannstellen die Umlenkrolle bzw. die Pottrolle sind. Die in Bild 3 gezeigten Moden I und II gehören zur Klasse der Translationsmoden. Die in Bild 3, rechts, eingezeichnete Achse, ist die Rotationsachse der Torsionsmoden.

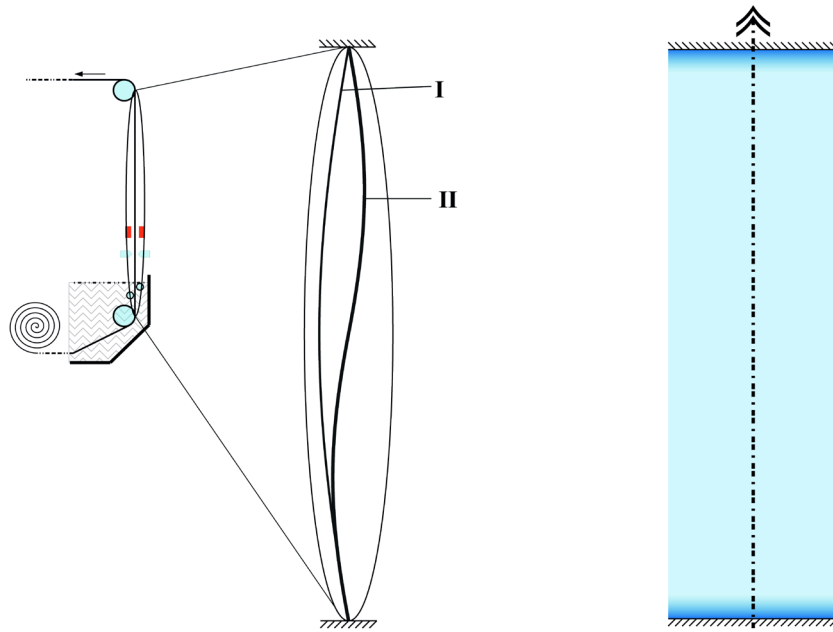


Bild 2: links: detaillierte Seitendarstellung des Bandes mit betrachteten Translationsmoden I und II; rechts: Frontalansicht des Bandes mit eingezeichneter Drehachse der Torsionsmoden

Nachfolgend sind in Bild 3 ausgewählte Bewegungsformen dargestellt, wobei von links die ersten beiden Translationsmoden und rechts die ersten beiden Torsionsmoden gezeigt werden.

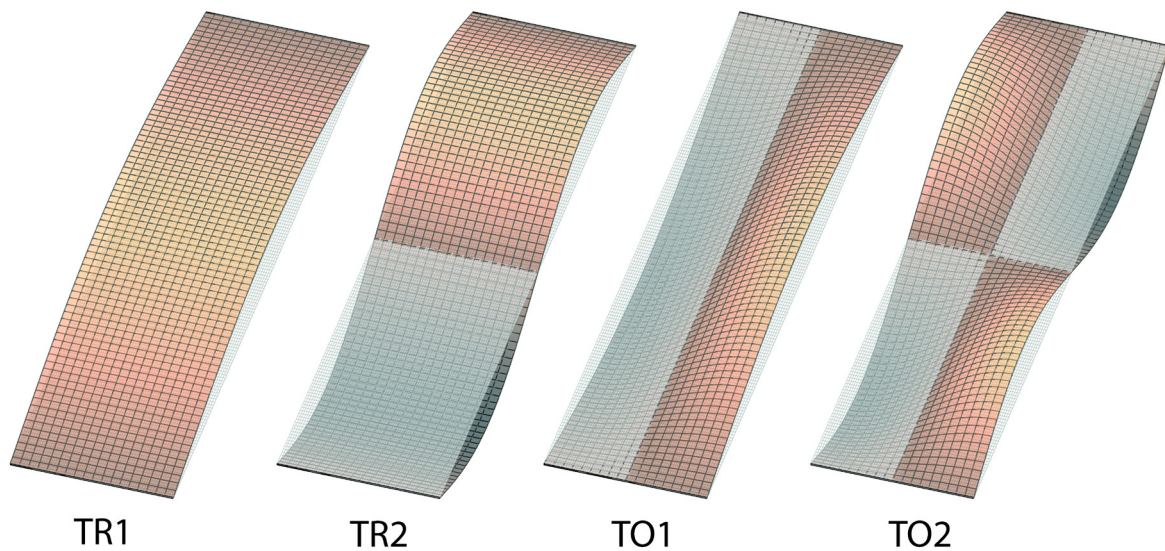


Bild 3: eine Auswahl von Bewegungsmoden eines zweiseitig eingespannten Bandes, TR1: erster Translationsmode, TR2: Translationsmode, TO1: Torsionsmode, TO2: Torsionsmode

Es werden nachfolgend lediglich die ersten Bewegungsformen betrachtet, da diese mit dem niedrigstem Energieaufwand angeregt werden können.

2.2 Aktuator und Sensor

Wie in Bild 1, rechts, gezeigt besteht der Bandstabilisator aus acht nebeneinander platzierten Aktuatoren, welche das Band positionieren können; in Bild 4 ist stellvertretend ein Aktuator gezeigt. Jeder Aktuator besteht im Wesentlichen aus zwei differenziell angeordneten Elektromagneten, welche jeweils über einen Stromverstärker angesteuert werden.

Zusätzlich ist jeweils vor und hinter dem Band ein Sensor angebracht, um den Abstand zwischen Aktuator und Band zu messen.

Ein einzelner Elektromagnet hat eine nichtlineare Kraftkennlinie, welche vom Abstand und Strom abhängt.

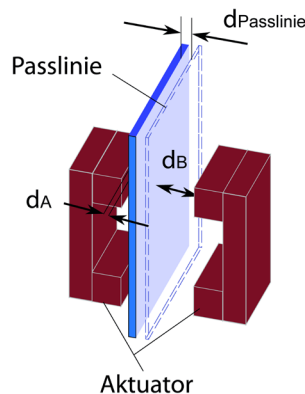


Bild 4: Detaildarstellung eines Aktuators mit Ausschnitt des Bandes; die Passlinie ist die geometrische Mitte zwischen den Elektromagneten; zwei Abstandssensoren messen den Abstand zwischen Band und Aktuator (d_A und d_B)

Die Bandposition wird mit Hilfe der Wirbelstromsensoren A und B bestimmt, welche differenziell vor und hinter dem Band angebracht sind.

2.3 Regelkreis

Das Band wird über die acht neben einander angeordneten Aktuatoren positioniert, wobei je der Aktuator mittels eines eigenen Regelkreises nach dem in Bild 5 gezeigten Schema angesteuert wird.

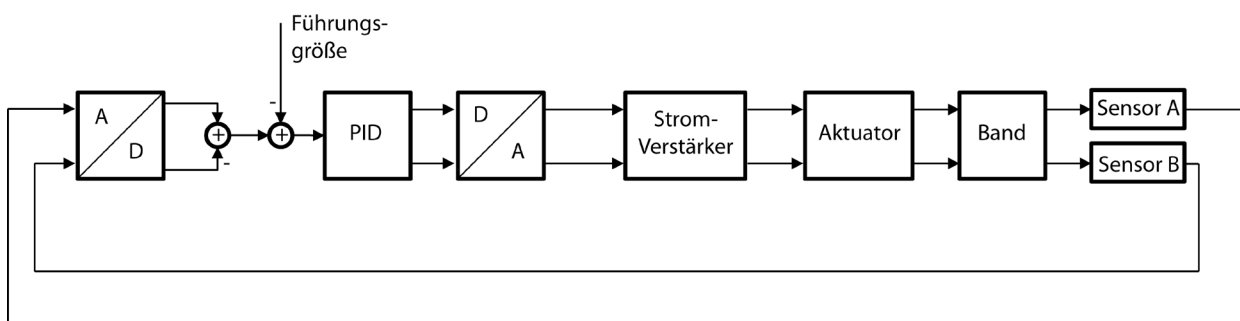


Bild 5: schematische Regelstruktur eines Aktuators

Es wird ein klassischer PID-Regler eingesetzt, bei dem die Differenz der Sensorsignale geregelt wird. Der PID-Regler liefert das Steuersignal des Stromverstärkers und damit den Strom für den Aktuator. Es ist jeweils nur ein Elektromagnet eines Aktuators aktiv.

Details des Bandstabilisators und des System sind der eMASS© Produktbroschüre [1] der EMG Automation GmbH zu entnehmen.

2.4 Symptome und Problemableitung

Bei der Qualitätskontrolle können Inhomogenität der Zinkschichtdicke festgestellt werden. Sehr auffällig ist ein periodisch wiederkehrende Tonänderung der Zinkschicht auf dem verzinken Blech entlang der Bandlänge, welcher auf unterschiedliche Zinkschichtdicken zurückzuführen ist. Die unterschiedlichen Zinkschichtdicken entstehen, wenn das Band sich mit unterschiedlichem Abstand an der Abstreifdüse vorbei bewegt. In Bild 6 ist ein Datenmitschnitt der Bandposition bezüglich der Passlinie zu sehen.

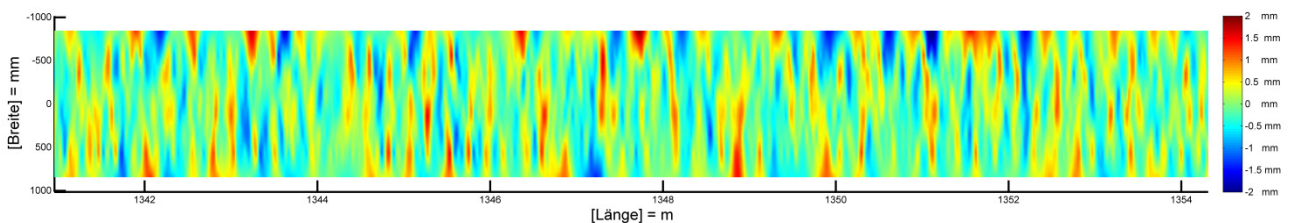


Bild 6: Datenmitschnitt des Bandes mit Bandstabilisierung, farblich codiert ist die Amplitude der Bandposition bezüglich der Passlinie.

Es ist eine immer wieder kehrende Bandpositionsänderung zu erkennen, welche als periodischer Farbtonänderung der Zinkauflage zu erkennen ist.

3 Modellierungsansatz

Für die vorliegende Anwendung werden lediglich zwei Bandformen betrachtet, die erste Translations- und die erste Torsionsmode, da diese aus energetischer Sicht die wahrscheinlichsten Bewegungsformen sind.

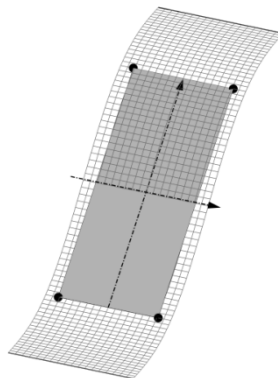


Bild 7: Approximation der Bandform mit einer Platte hier am Beispiel der ersten Translationsmode

Wie in Bild 7 zusehen approximiert man einen Ausschnitt des Bandes mit einer rechteckigen Platte. Beschreibt man nun die Bewegung der Platte kann man die Bewegung des Bandes für die ausgewählten Moden approximieren. Das System aus vier verbundenen Masse-Feder-Dämpfersystemen beschreibt die Bewegung der ausgewählten Moden, translatorische Bewegungen sind nur in y Richtung zugelassen. Zusätzlich sind Drehbewegungen um die x- und die z- Achse möglich.

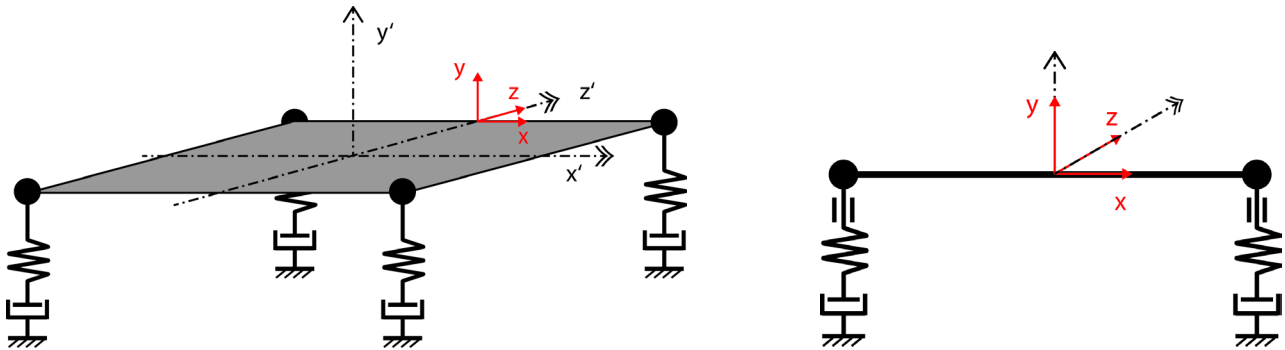


Bild 8: links: 4-Masse-Feder-Dämpfer System zur Approximation der ausgewählten Bewegungsformen
rechts: 2-Masse-Feder-Dämpfer System zur Beschreibung des beobachtbaren Teilsystems

Begründet durch die Anordnung der Abstandssensoren, sind nicht alle Teile des Systems beobachtbar. Daher wird nachfolgend lediglich das beobachtbare Teilsystem betrachtet. Es wird auf ein 2-Masse-Feder-Dämpfer (Bild 8, rechts) reduziert, da verschiedene Translationsmoden bzw. verschiedene Torsionsmoden nicht voneinander unterschieden werden können.

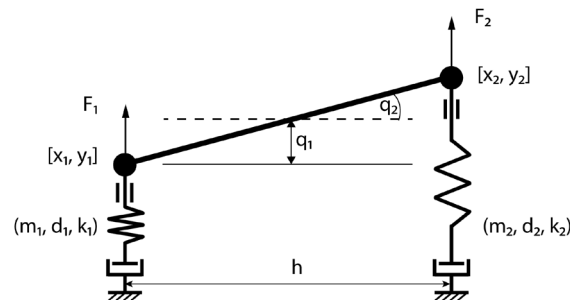


Bild 9: 2-Masse-Feder-Dämpfer System, zur Beschreibung der ausgewählten Moden des Bandes

Die generalisierten Koordinaten des Systems sollen der Mittelwert aus den y-Positionen der beiden Massepunkte q_1 und der Winkel der Verbindungsachse bezüglich der x-Achse q_2 sein. Für sehr kleine Auslenkungen gilt $\tan(q_2) \approx q_2$

$$q_1 = \frac{y_1 + y_2}{2} \quad q_2 = \tan^{-1} \left(\frac{y_1 - y_2}{h} \right) \approx \frac{y_1 - y_2}{h} \quad (1)$$

Mit Hilfe der generalisierten Koordinaten kann das System wie folgt beschrieben werden:

$$\begin{aligned}
F_1 + F_2 &= (m_1 + m_2)\ddot{q}_1 + (d_1 + d_2)\dot{q}_1 + (k_1 + k_2)q_1 + \\
&+ \frac{h}{2}(m_1 - m_2)\ddot{q}_2 + \frac{h}{2}(d_1 - d_2)\dot{q}_2 + \frac{h}{2}(k_1 - k_2)q_2
\end{aligned} \tag{2a}$$

$$\begin{aligned}
\frac{h}{2}(F_1 - F_2) &= \frac{h}{2}(m_1 - m_2)\ddot{q}_1 + \frac{h}{2}(d_1 - d_2)\dot{q}_1 + \frac{h}{2}(k_1 - k_2)q_1 + \\
&+ \frac{h^2}{4}(m_1 + m_2)\ddot{q}_2 + \frac{h^2}{4}(d_1 + d_2)\dot{q}_2 + \frac{h^2}{4}(k_1 + k_2)q_2
\end{aligned} \tag{2b}$$

Nimmt man den speziellen Fall an, dass die Eigenschaften der beteiligten Masse-Feder-Dämpfer Systeme identisch sind: $m_1 = m_2 = m$; $d_1 = d_2 = d$; $k_1 = k_2 = k$ ergeben sich die folgenden vereinfachten Bewegungsgleichungen.

$$F_1 + F_2 = 2m\ddot{q}_1 + 2d\dot{q}_1 + 2kq_1 \tag{3a}$$

$$F_1 - F_2 = hm\ddot{q}_2 + hd\dot{q}_2 + hkq_2 \tag{3b}$$

Die vereinfachten Bewegungsgleichungen kann man mit der folgenden systematischen Modelstruktur zweiter Ordnung beschreiben:

$$G(s) = \frac{K_s \omega_0^2}{\omega_0^2 + 2D\omega_0 s + s^2} \tag{4}$$

4 Identifikationsexperiment

Die Identifikationsversuche finden bei laufender Produktion an einer Verzinkungslinie statt und müssen daher mit dem Anlagenbetreiber abgestimmt werden. Es werden einzelne Aktuatorpaare mit Hilfe eines Signalgenerators angesteuert, sodass die ausgewählten Moden gezielte angeregt werden können.

4.1 Versuchsaufbau

Das Signal wird, wie in Bild 10 gezeigt, direkt am Stromverstärker eingespeist. Für die Zwecke des Identifikationsexperiments wird der Regelkreis geöffnet. Es wird der Stromverstärkerausgang, der in den Elektromagneten fließende Strom, aufgezeichnet. Des Weiteren werden die Signale der Sensoren A und B aufgezeichnet um eine spätere Offline Identifikation mittels der System Identification Toolbox© in Matlab durchzuführen.

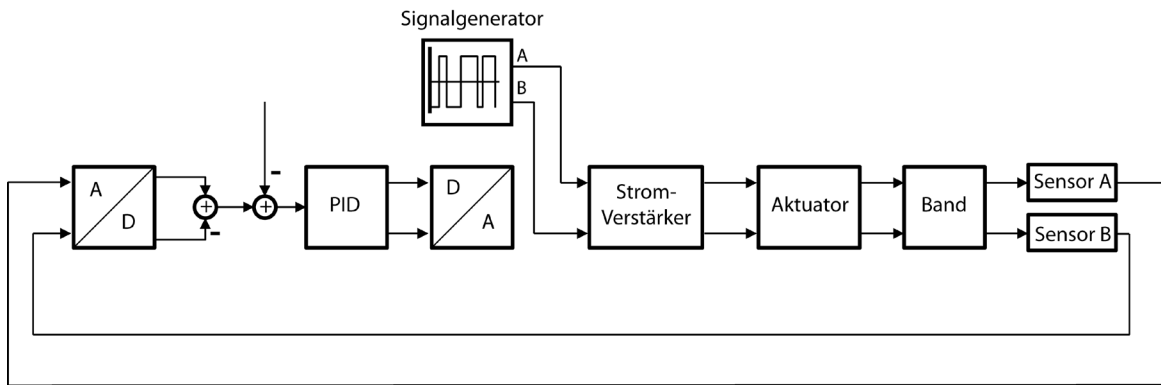


Bild 10: Blockschaltbild des Experimentsetup mit integriertem Signalgenerator im geöffneten Regelkreis

4.2 Systemanregung

Um eine breitbandige Anregung des Systems zu gewährleisten, wurde ein Pseudo-Binary-Random-Signal (PRBS) verwendet. Die Eigenschaften eines PRBS sind einem weißen Rauschen, der idealen Systemanregung, in einem begrenzten Frequenzbereich sehr ähnlich. Die technische Realisierung eines PRBS ist sehr einfach und wurde in festen Signalfolgen, verschiedener Länge, in einem Signalgenerator abgespeichert. Es können die Signalfolgelänge, die Amplitude und die Schaltzeit eingestellt werden. Das Signal wurde so erstellt, dass das Metallband mit Frequenzen bis 40 Hz angeregt wird.

Die gezielte Anregung der Translationsmoden erfolgt, wie in Bild 11 gezeigt, durch die synchrone Anregung aller beteiligten Aktuatoren mit dem gleichen Signal.

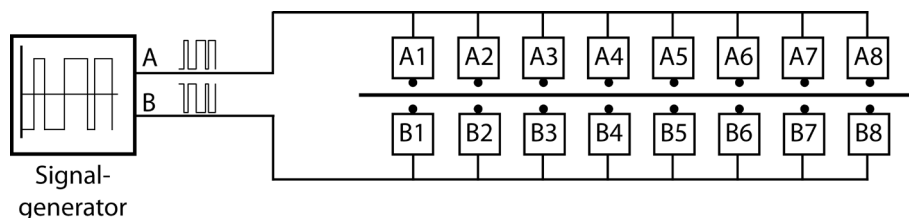


Bild 11: Synchrone Ansteuerung alle Aktuatoren, zur Anregung der Translationsmode

Für die Anregung der Torsionsmoden werden die Aktuatoren in eine linke und eine rechte Gruppe unterteilt. Die Anregung erfolgt durch gegensinniges Ansteuern der linken und der rechten Aktuatorgruppe, welches in Bild 12 veranschaulicht wird.

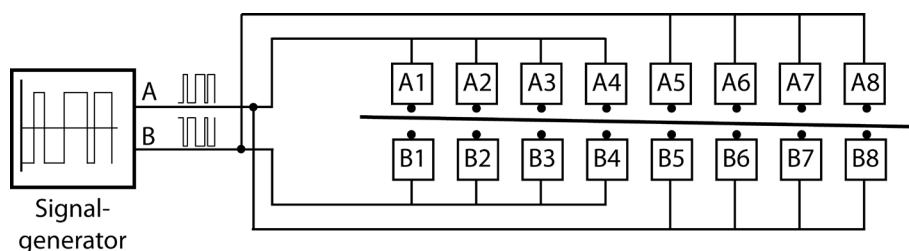


Bild 12: Gegensinnige Ansteuerung der rechten und linken Aktuatoren, zur Anregung der Torsionsmode

5 Ergebnisse der Identifikation

Folgend werden die Ergebnisse der Parameteridentifikation vorgestellt. Die Versuche wurden an verschiedenen Coils durchgeführt, wobei es bis zu fünf Wiederholungen je Coil gegeben hat, es wird hier repräsentativ nur ein Versuchsscoil je Modus gezeigt.

5.1 Translationsmodus

Für den Identifikationsprozess werden die Mittelwerte der Eingangs- und Ausgangssignale gebildet, dies geschieht durch die Mittelung aller aktiven Aktuatoren Differenzsignale der Sensoren bzw. der Aktuatoren in jedem Zeitschritt. In Bild 13 sind die Bodediagramme der identifizierten Modelle zu sehen, wobei das Experiment fünfmal wiederholt wurden ist.

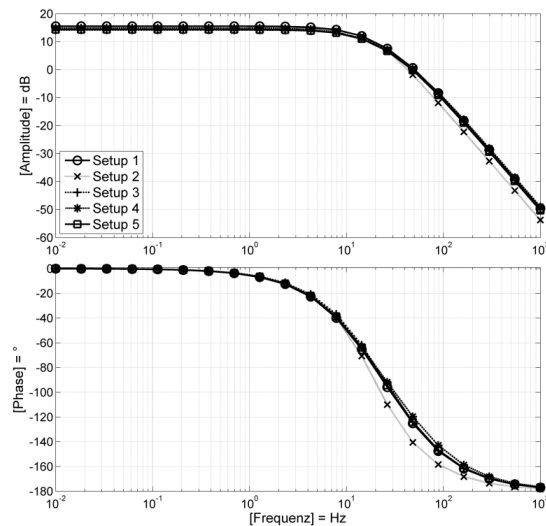


Bild 13: Bode-Diagramm der Identifizierten Modelle zur Beschreibung der Bandbewegung einer Translationsmode

Setup	Ks	D	f0
1	5,98	1,11	3,75 Hz
2	5,47	0,86	3,08 Hz
3	5,14	1,06	3,93 Hz
4	5,51	1,21	4,04 Hz
5	5,20	1,11	3,96 Hz

Tabelle 1: Identifizierte Modellparameter der Translationsmode

In Tabelle 1 werden die identifizierten Modellparameter aufgelistet, welche hier lediglich für ein sich ideal verhaltenden System gelten. Es zeigt sich eine gute Dämpfung des Systems. Die Eckfrequenz liegt zwischen 3,08 Hz und 4,04 Hz, wobei die Variation der Parameter näher untersucht wird, um den Einsatz einer modelgestützten Regelung zu begründen.

Ändern sich die idealen Bedingungen, sodass die Masse-Feder-Dämpfer System des beobachtbaren Teilsystems nicht identisch sind, so kommt es direkt zu Struktur- und Parameteränderungen.

5.2 Torsionsmodus

Die Auswertung des Torsionsmodus erfolgt durch die Subtraktion der linken und rechten gemittelten Differenzsignale der Sensoren bzw. Aktuatoren.

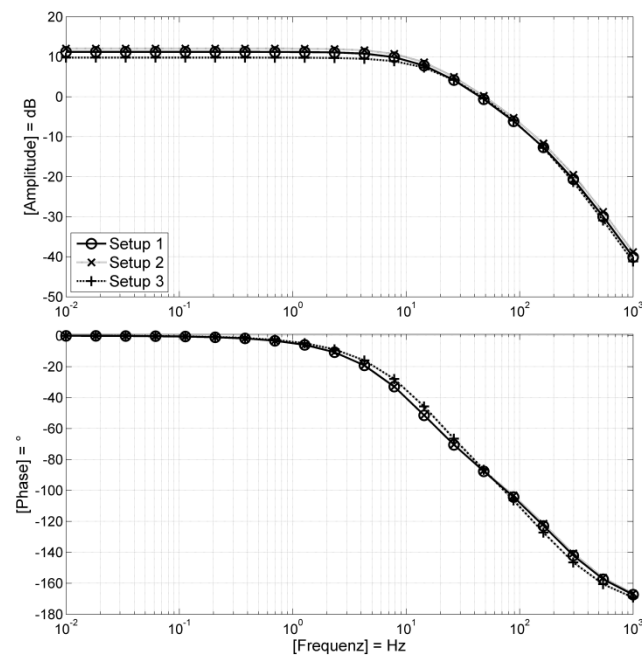


Bild 14: Bode-Diagramm der Identifizierten Modelle zur Beschreibung der Bandbewegung einer Torsionsmode

Setup	K_s	D	f_0
1	3,63	2,13	8,40 Hz
2	4,00	2,18	8,60 Hz
3	3,08	1,78	8,54 Hz

Tabelle 2: Identifizierte Modellparameter der Torsionsmode

Die geschätzte normierte Dämpfung D zeigt einen stark gedämpften Torsionsmodus mit einer Eckfrequenz von ca. 8,5 Hz. Diese Schlussfolgerungen gelten ebenfalls für ein sich ideales Systemverhalten. Eine Abweichung von den oben angenommenen idealen Systembedingungen folgt direkt zu einer Modellstrukturänderung und einer Parametervariation.

6 Literatur

- [1] <http://www.emg-automation.com/nc/automation/qs-systeme/elektromagnetische-bandstabilisierung-emass/action/open-download/download/broschuere-emass-de/>
[24.11.2014]
- [2] Lennart Ljung. @System identification: Theory for the user. 2. Aufl. 11. print. Prentice all information and system sciences series. Upper Saddle River und NJ: Prentice-Hall, 2009
- [3] Rolf Isermann und Marco Münchhof. Identification of dynamical systems: An introduction with applications. Advanced textbooks in control and signal processing. Berlin und Heidelberg: Springer-Verlag, 2010
- [4] Klaus Janschek. Systementwurf mechatronischer Systeme: Methoden, Modelle, Konzepte. Heidelberg: Springer, 2010